第3章

事例で学ぶ電磁界解析シミュレータ活用の勘どころ

EMC問題を対策技術から設計技術にシフトするための有効なツール

伊神眞一，福田 薫

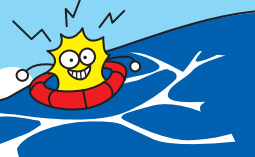
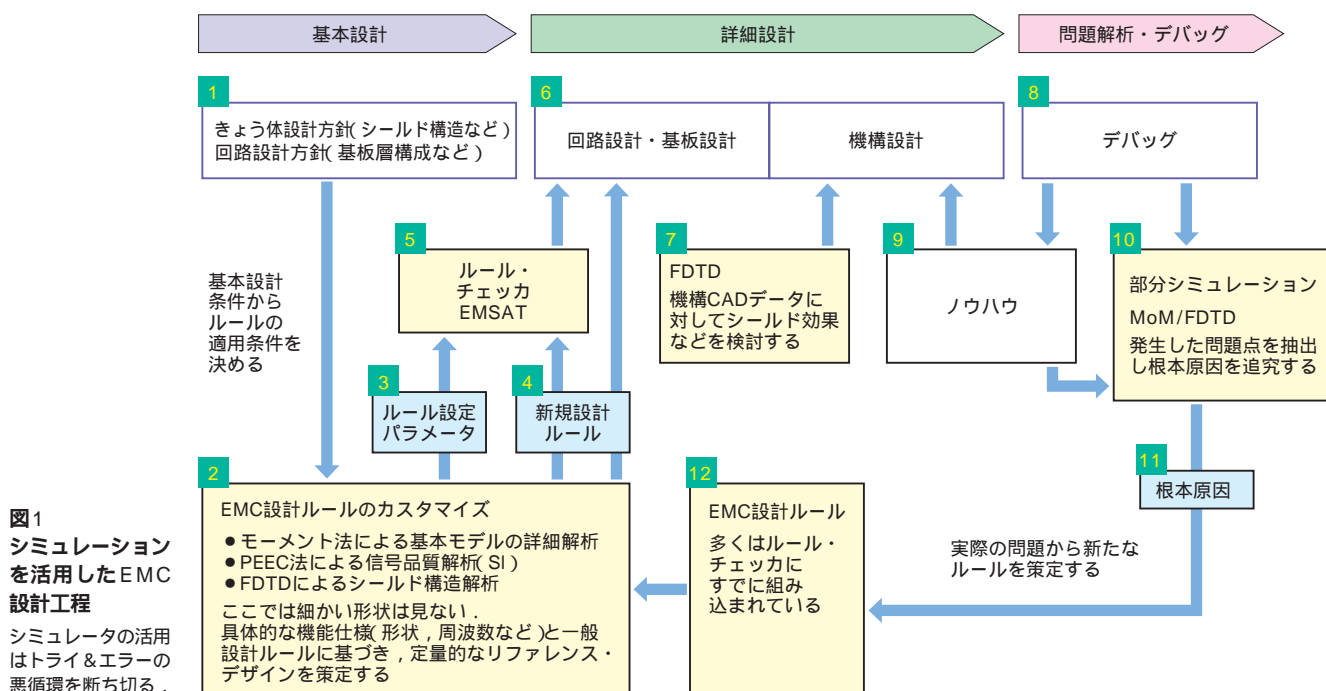
電磁界解析シミュレータを使うと，目に見えなかった電磁波の動きを捉えられる．トライ＆エラーのデータを蓄積し，シミュレータの習熟度が上がれば，漠然と効果を期待していた放射対策が適材適所に施せるようになる．（編集部）

IT機器などに代表される電気・電子機器の開発において，EMC（electro-magnetic compatibility）に関する問題は長引くことが多いと思います．EMC問題は，モジュール個々で問題を解決できても，機器全体を組み上げた状態で解決できなければ出荷できません．また，個々のモジュール単体でテストできない場合もあります．従って，評価自体の開始が遅れてしまうわりには，製品の発表，出荷日は決まっていることにより，対策が後手にまわり，大味な対策を採用せざるを得ないことも少なくありません．そうなると対処療法的な対策が主流となり，問題の本質に踏み込めないまま後継機種の開発が始まり，結局，同じ失敗を繰り返してしまいます．

図1 シミュレーションを活用したEMC設計工程
シミュレータの活用はトライ＆エラーの悪循環を断ち切る．

KeyWord SPICE，FDTD，メッシュ，多層基板，イミュニティ，カード・エッジ，アンテナ，シミュレータ

1. トライ＆エラーの悪循環を断ち切る

この悪循環を断ち切るために，開発初期からEMC対策を開始し，現場でトライ＆エラー（カット＆トライ）を繰り返すことも重要です．しかし，これだけではEMC問題を定性的にみることに限界があります．

現場の問題を定性的に解析する一つの手段として，電磁界解析シミュレータが活躍します．電磁界解析シミュレータはEMC問題だけでなく，無線通信モジュールを搭載した機器におけるイントラ・システムEMI[注1]問題の解決にも威力を発揮します．このように電磁界解析シミュレータは，EMC問題を対策技術から設計技術にシフトするための有効なツールといえます（図1）．

● 解析方法は大別して三つ

機器のEMC設計の際に利用される電磁界解析シミュレータ（図2）の解析方法は，三つに大別できます．

一つは回路シミュレータであるSPICE（simulation program with integrated circuit emphasis）を応用したシミュレータです．このシミュレータは，電圧・電流を時間領域で解析します．解析の対象を集中定数回路の集まりとして計算するため，一般に電磁界の解析に必要となる分布定数回路の解析には不向きです．

二つ目は解析の対象の物性も含めて，対象を3次元で分割してモデルを数式化し，境界条件から解を計算する電磁界解析シミュレータです．

三つ目はMaxwellの方程式を空間および時間領域の差分法を使って解いていくFDTD（finite difference time domain）という手法のシミュレータです．また，計算をモデルについて忠実に解析するもの，近似を用いるものなどもあります．

EMC問題を解析する際には，各シミュレータの特徴を見定め，解析する目的に応じて利用することが重要となります．

2. シミュレーションを使った EMC設計・対策例

機器のEMC設計にシミュレーションを使用する場合を考えます．機器に使用されているすべての部品の属性，およびその動作に関する情報をシミュレータに入力できたとします．さらに，入力された情報の量が，シミュレータで

3

注1　イントラ・システムEMIとは，ノート型パソコンや携帯端末などの情報技術装置に無線通信機能が付いている場合，情報技術装置から発生する放射エミッション・ノイズが，情報技術装置に内蔵された無線装置に影響を及ぼし，無線通信の機能障害が発生することをいう．

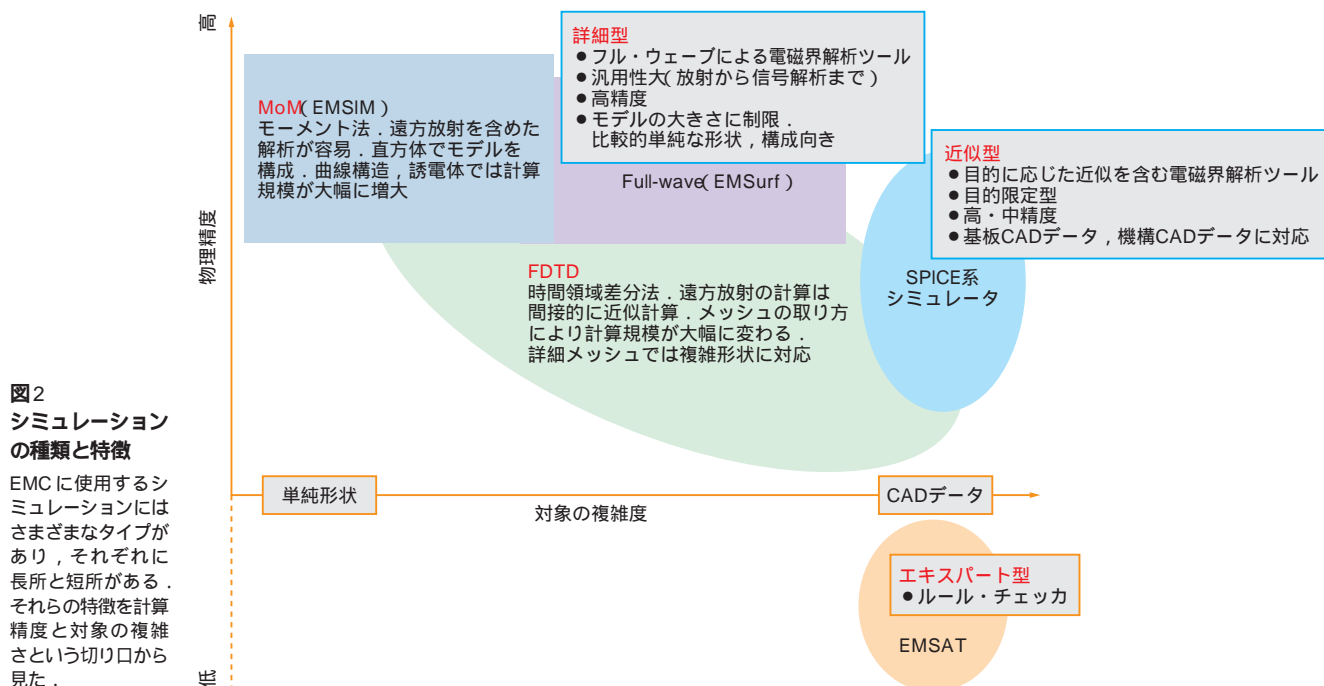



図2 シミュレーションの種類と特徴
EMCに使用するシミュレーションにはさまざまなタイプがあり，それぞれに長所と短所がある．それらの特徴を計算精度と対象の複雑さという切り口から見た．

計算できる規模内であれば，機器全体を計算させる意味はあるかもしれません．しかし，計算時間，計算結果の解析などの観点から実用に即したもとのとはいえないのも事実です．CAD（computer aided design）ツールにより設計されたデータを，そのままシミュレータに入力すると，多くの場合，計算時のメッシュが非常に細かくなり，計算規模が増大していまいます．そこで，計算結果に及ぼす影響を抑えながらメッシュの数を減らすようなモデル作成手法が必要となります．

機器のEMC設計には，プリント基板などの電気的な設計と，きょう体のシールドやフレーム・グラウンドなどの機構設計があります．これらの二つの設計に対してモーメント法タイプの電磁界解析シミュレータを利用したEMC設計例を紹介します．

はじめに，シミュレーションによる評価のために，基準となる基本モデルを作成します．この基本モデルはその後に作成する複雑なモデル，あるいはパラメータを変更するモデルのベースとなるので，モデルの変更に自由度が必要であることを念頭におく必要があります．また，モーメント法などのシミュレーションのように，メッシュによって分割して計算するタイプのシミュレータの場合，メッシュの切り方によって計算結果が異なることがあります．部分的に異なるモデルを比較計算する場合は，より複雑なモデルで使用したメッシュを簡単なモデルにも適用することで，比較が可能となります．モデルごとに異なるメッシュで計算した場合，結果を単純に比較できない場合もおこり得ます．そういうときは，使用するシミュレータのマニュアルなどで確認するとよいでしょう．

● 例1…デカップリング・コンデンサの配置位置

マイクロストリップ線路のプリント基板（**図3**）をモデルにして，デカップリング・コンデンサを増やしていきます．**図4**にプリント基板の解析モデルを示します．この基板単体からの放射を考えます．100MHzから1GHzにおいて，四つの共振周波数が存在しています．

共振点はモデルの構造に起因したものですが，240MHz付近の共振は四つのモデルに共通していることからも分かるように，信号線による共振です．また，1GHzの共振は，電流分布からもプリント基板の電源層とグラウンド層で形成される平行平板共振であることが分かります．

共振周波数と装置が使用する発振器の周波数の高次高調波が一致すると，より大きな放射エミッションが観測されるばかりでなく，共振周波数のノイズが外部から誘起されやすくなり，イミュニティ（電磁波ノイズを受けたときの耐性）の低下も考えられます．

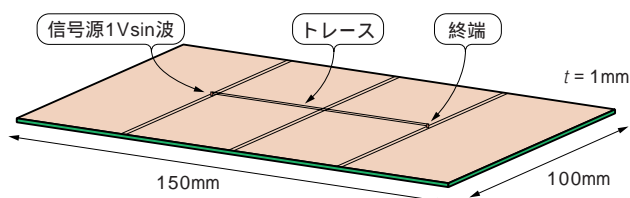



図3　マイクロストリップ線路のシミュレーション・モデル
デカップリング・コンデンサを挿入していく．図4に解析結果を示す．

電磁界解析シミュレータを使って共振周波数を制御することを考えましょう．一般に共振周波数を変化させることはできますが，共振自体をなくすことはできません．対象とする周波数を1GHzまでとすると，それ以上の周波数に変化させることが可能です．例えば，本モデルでは，2枚のプレーン（電源層とグラウンド層を想定）間にデカップリング・コンデンサを配置することで，高周波電流の経路が形成されます．コンデンサの位置と数を調整することで，共振周波数を変更できます．

プリント基板で使用する発振器の周波数の高次高調波が，規制される周波数範囲内に存在する場合，その該当する周波数が基板の共振周波数と一致しないようにするために，デカップリング・コンデンサの位置を調整します．広い周波数範囲を対象とする場合は，共振周波数を排除することは困難ですが，損失成分を追加するなどして共振の鋭さ（Q）を下げるとよいでしょう．

● 例2…高周波モジュールと近傍金属との結合

高周波モジュールにヒートシンクなどの金属板が近接したときの影響を考えます．ノート型のパソコンでは，ユーザがメモリを増設をできるように，きょう体に開口部が設けられていることがあります．その開口部にはシールド板付きのカバーぶたが付けられており，メモリのモジュールとシールド板との距離は近接しています（**図5**）．また，CPUやグラフィックス・プロセッサのように高速処理が必要なLSIは，一般的に発熱量も多いため放熱対策を講じる必要があります．

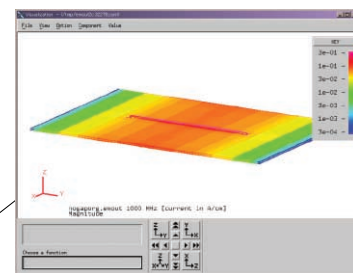
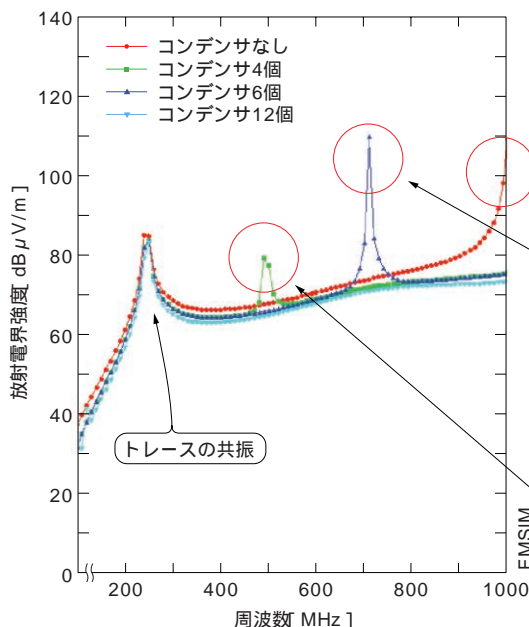
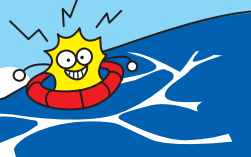
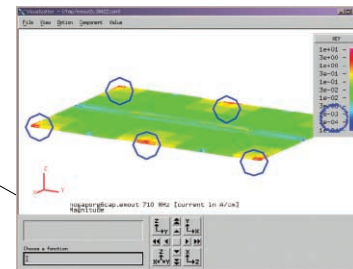
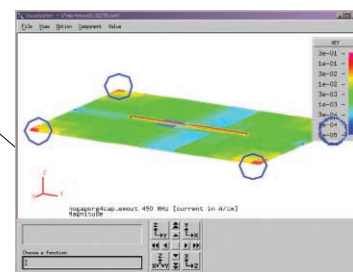
放熱対策として熱伝導率の良さから金属，特に銅などが用いられます．放熱の観点からは，高周波モジュールと金

(a) 平行平板共振時の電流分布(コンデンサなし)

(b) コンデンサ6個のときの電流分布

(c) コンデンサ4個のときの電流分布

図4
コンデンサの配置による共振周波数の変化
図3の解析結果.

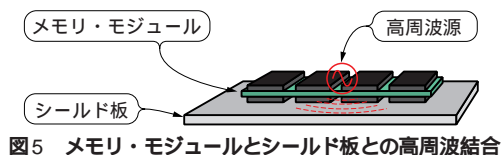



図5　メモリ・モジュールとシールド板との高周波結合

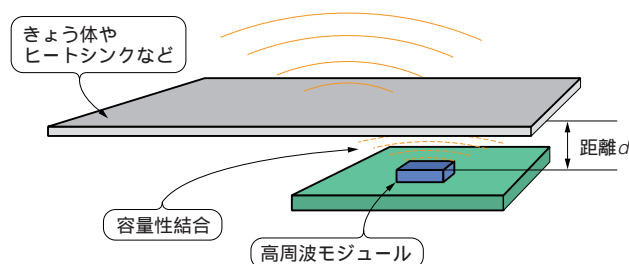



図6　高周波モジュールと近傍の金属との結合
モジュールから金属板へ高周波電流が流れ，結果として放射エミッションが増大する.

属板との距離をできるだけ小さくするほうが有利です．しかし，銅などの金属は熱伝導率が高い(大きい)のと同時に，電気的に良導体でもあります．また，携帯型の製品では小型化，薄型化のために高周波モジュールとほかの構造体とが近接した構造がみられます．このような構造では，高周波モジュールと金属板との容量性結合が大きくなり，モジュールから金属板へ高周波電流が流れ，結果として放射エミッションが増大します(図6).

では，どの程度の距離を保てばよいかを電磁界解析シミュレータで計算してみましょう．図7は計算モデルです．プリント基板上に高周波モジュール(10mm×10mm×1mm)を配置します．さらにその上方に金属板(30mm×70mm，シミュレーションのため厚さ0mm)を置きます．高周波モジュールの上面と金属板との距離を0.1mm～2mmまで変化させたとき，放射エミッションがどのように変化するか，計算しました(図8)．計算結果から，高周波モジュールと金属板との距離が近いほど，放射エミッションが大きいことが分かります.

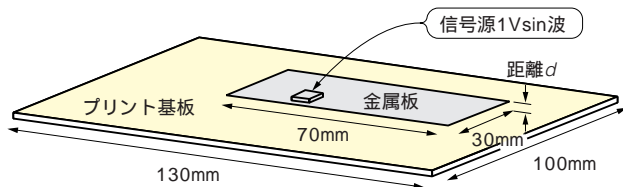



図7　金属板の影響をシミュレーションするためのモデル
図8に結果を示す．

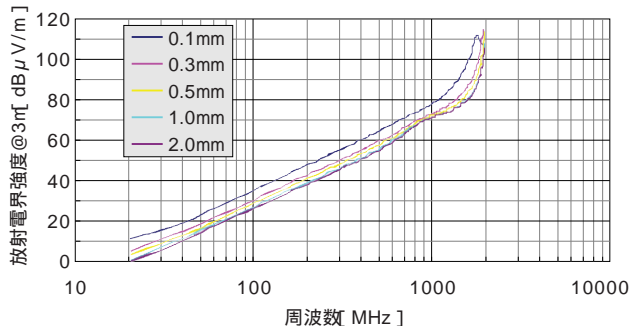



図8　距離dを変化させたときの放射エミッションの変化
高周波モジュールと金属板との距離が近いほど，放射エミッションが大きい．

図9　金属板と高周波モジュールの距離と放射電界強度(500MHzのとき)
距離0.1mmでは10dB以上悪化している．

図9は500MHzにおける距離と放射エミッションの関係をグラフ化したものです．金属板がないときのレベル(53dB μ V/m)と比較して，距離0.1mmでは10dB以上悪化していますが，距離2mmでは悪化は1dB以下です．実際には高周波モジュールと金属板の間にはシリコーン・グリスやサーマル・ラバーなどが挿入されますが，この材質が厚くなると熱抵抗のために十分な熱伝導ができなくなります．

熱とEMCの両方を満足できる間隔を，熱シミュレーションと電磁界解析シミュレータで求め，実機で確認することになります．

● 例3…メッシュの切り方による違い

図10は同じシミュレーション・モデルに対して，メッシュを粗くした場合と，メッシュを細かく切った場合の放射エミッション値です．メッシュを粗くした場合は，細かくした場合と比較して実測値からの誤差が大きくなります．

モーメント法に限らず，メッシュを切る際に，電流の変化が大きくなる部分，あるいは大きくなると予想される部分(例えば電流源や終端とその周辺など)のメッシュは，ほかの部分より細かくしないと，実際との誤差が大きくなります．

モデルを作成するときに現物に忠実にモデル化し，そのモデルを計算機が解析できれば，精度は高いと考えられます．しかし，複雑な形状のモデルでは，計算機の扱える上限を超えてしまい実際的ではありません．精度を維持しながらモデルを簡単化するノウハウが必要となります．

では，どこを簡単化すれば精度が維持できるのでしょうか．使用するシミュレータにもよりますが，モーメント法タイプのシミュレータの場合，計算規模はメッシュの数(ノードの数)が多いほど時間がかかるので，メッシュの数を減らす工夫が必要です．やみくもに減らしてしまうと本来の値からの偏差が大きくなってしまいます．

つまり電流源や終端付近のメッシュは細かく設定しておくことが大切です．粗さの最大値としては，必要となる周波数の上限の波長の1/10以下程度とします．例えば1GHzまで計算結果が必要な場合は，最も粗いメッシュの長さは30mm以下までとします．シミュレーションで比較計算をする場合，メッシュを切る位置を同じにしなければなりません．切り方が異なる場合，同じモデルでも結果が異なることがあります．計算結果から効果があったようにみえる変更が，実はメッシュの切り方の違いによるものであったということも考えられます．

● 例4…基板端の信号線からの放射

電磁界解析シミュレータを使いこなす鍵の一つにEMC設計ルールの作成があります．EMC設計ルールとは，機器のEMC性能を十分に高めるためにどのように設計すればよいかを定めたルールです．例えばプリント基板の設計時にクロックなどの高速な信号を配線する場合，カード・

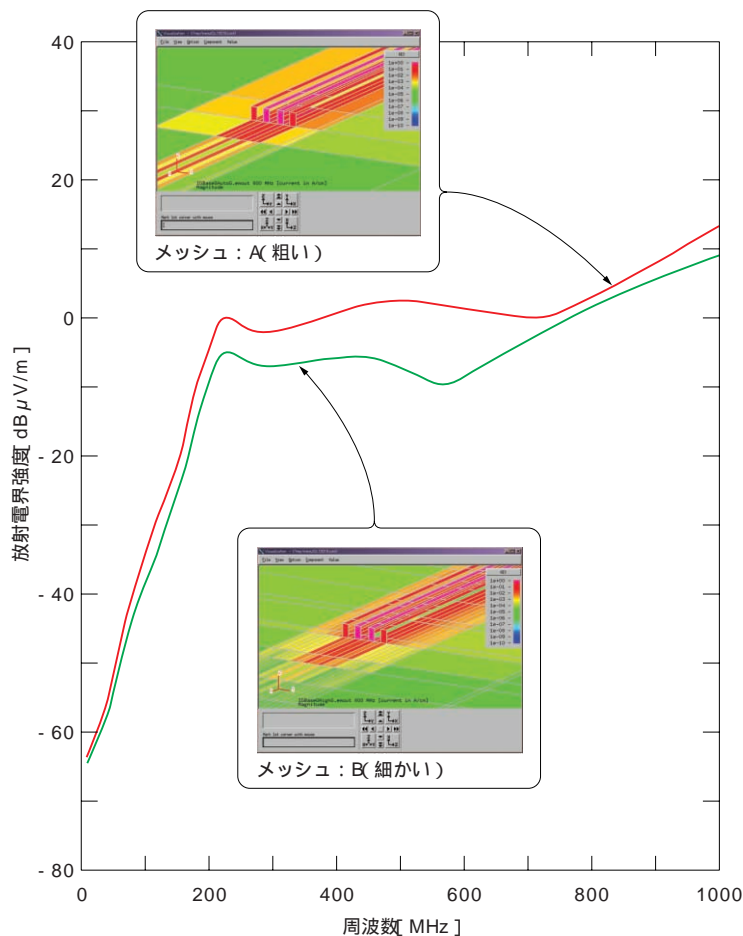



図10　メッシュの切り方による放射エミッションの違い
メッシュを粗くした場合は細かくした場合と比較して実測値からの誤差が大きくなる．

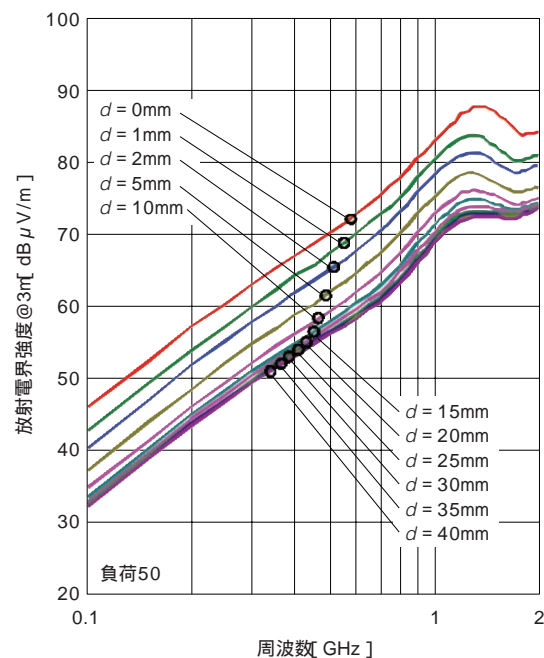



図12　基板端までの距離と放射電界強度との関係
カード・エッジからトレースを15mm程度の位置に配線することで，中央に配線した場合（40mm）との差が3dB以内となっている．

エッジ（基板の端部）に配線するほど放射エミッションが高くなることが知られています[3][4]．カード・エッジからの距離と放射の強度の関係を知らないと，どの程度まで端部に近づくと問題があるか，といった具体的な設計指標を定められません．そこで，図11のようなモデルを例に電磁界解析シミュレータを使って計算してみましょう．

モデルは100mm×80mm，厚さ1mmのプリント基板です．基板の一方の面をべたグラウンドとし，他方の面に信号線を配線したマイクロストリップ構造です．信号線は長さ60mm，幅0.5mmのトレースとし，このトレースの位置を，プリント基板のある1辺に対して0mm～40mmまで変化させることとしました．その際に，このプリント基板から3mの場所における放射エミッションを計算しました（図12）．

計算結果から，このモデルの場合，カード・エッジからトレースを15mm程度の位置に配線することで，中央に配

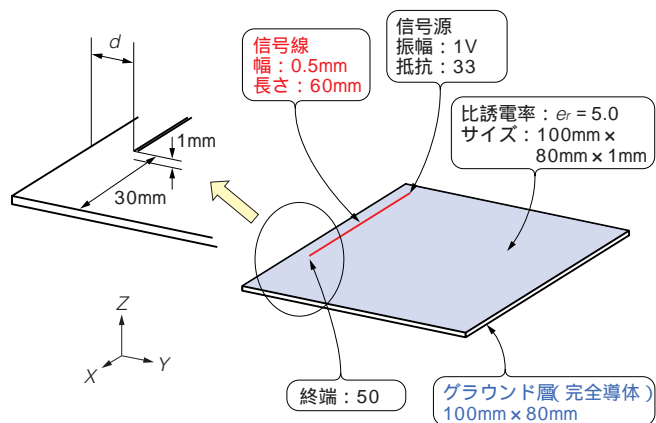



図11　基板端への配線モデル
基板の一方の面をべたグラウンドとし，他方の面に信号線を配線したマイクロストリップ構造．

線した場合(40mm)との差が3dB以内となっています．また，カード・エッジから2mm以内に配線すると，中央に配線した場合と比較して放射エミッションが10dB以上増大しています．高速なクロック配線など，いわゆるクリティカル・ネットに関して，カード・エッジに配線することは放射エミッションを増大させる一因になることが分かります．

しかし，実際にはクロック以外の信号ならばカード・エッジに配線してもEMCの観点から問題はないのでしょうか．プリント基板やそのトレースは電磁気的にアンテナと考えられます．アンテナは一般に可逆性(相反性)があるので，放射効率の良いアンテナは，同時に受信効率の良いアンテナでもあります．このモデルをアンテナとして考えてみます．

シミュレーションの計算結果をアンテナ・ゲインに変換すると，カード・エッジから1mmに配線したモデルにおける*y-z*平面での平均ゲインは，カード・エッジから15mmに配置したモデルと比較して8～9dB程度高くなっています．このことから，高速な信号線以外の信号線であれば，カード・エッジに配線しても問題ないというルールを作成すると，放射エミッションは低減できますが，イミュニティに関する問題が残る可能性があります．

例えば，振幅の小さい信号やリセットなど，外部からのノイズに対して，ノイズ・マージンが小さな信号線をカード・エッジに配線したとします．リセットの信号線は，通常は状態が"H"(または"L")の信号線であるため，ESD(electrostatic discharge；静電気放電)などに代表される外部からの電流・電界の印加により，信号線が効率良く受電することで，誤作動が発生しやすくなり，イミュニティ(耐性)が低下します[2]．

実際のプリント基板の設計においては，カード・エッジに配線せざるを得ないケースもあると思います．その場合は，基板の外周部にガード・グラウンドを配線することで改善されます(放射エミッションの低減，および耐性の向上)．このことは実際のプリント基板でも確認されています．

また，多層基板の場合はこれらの信号線を内層(電源層とグラウンド層の間の層)に配線すると，外層(電源層，グラウンド層より外側の層)に配線したときと比較して，カードエッジの影響が相対的に小さくなります．

＊　　＊

このように電磁界解析シミュレータを利用すると，EMC設計ルールを定量的に定めることが可能となります．しかし，さまざまなルールを定量的に定めていくと，ルールのしきい値が実際の設計とそぐわない値になったり，また，複数のルールを同時に適用する場合，ルール同士が相反することも考えられます．どのルールを優先するか，順位付けが必要になることもあります．

機器のEMC設計においては，ある部分，あるルールでは逸脱していても，ほかの部分でそれを補うことも可能です．EMC設計はトータル・バランスが必要です．少し複雑なモデルになるかもしれませんが，設計エンジニアが考えるバランスのとれたモデルをシミュレーションしてもよいでしょう．

参考・引用*文献

(1) Bruce Archambeaultほか著，澁谷 昇ほか監訳；EMI/EMCのための数値計算モデリング技術，2006年1月，ミマツコーポレーション．
(2) 福田 薫；ESDによる金属板の開口部付近の回路への影響，第15回 エレクトロニクス実装学術講演大会予稿集，2001年3月．
(3) 福田 薫，椛山 英樹；プリント基板におけるEMIルール間の優位性について，第13回 エレクトロニクス実装学術講演大会予稿集，1999年3月．
(4) 伊神眞一；ディジタル機器のEMC設計と対策，電子情報技術産業協会 電子関連EMC幹事会 EMC講演会資料，2003年11月．
(5) J. H. Magerlein, Barry Rubin；EMSIM User's Guide, Mar 2000.
(6) J. Morsey；EMSurf(ElectroMagentic Surface Simulator) User's Guide, Jan2007.

いかみ・しんいち，ふくだ・かおる
日本アイ・ビー・エム(株)　大和研究所　技術開発センター
EMC・RFシミュレーション技術開発

<筆者プロフィール>

伊神眞一．1982年に日本アイ・ビー・エムに入社，端末装置の開発に従事しEMCに出会う．その後シミュレーションが本格的に利用され始め，EMC専門部門に移る．ノート・パソコンなどのEMC設計を行いながら，問題解決ツールとしてシミュレーションをいかに活用するか考え続け現在に至る．

福田 薫．1986年に日本アイ・ビー・エムに入社以来，EMC/EMIに従事．製品のEMC設計として，十数年前にThinkPadの前身である「PS/2 Note(日本名：PS/55 Note)」というA4サイズのノート型パソコンを米国に出荷するためにEMI対策を実施したのが発端．最近ではRFIDなどの無線技術にも従事．